文章编号:1000-4939(2022)05-0947-11

钢纤维全再生粗骨料混凝土力学性能试验及强度指标换算

苏炜炜[1],陈宗平[1,2,3],廖浩宇[1],周星宇[1]

(1. 广西大学土木建筑工程学院,530004 南宁;2. 南宁学院土木与建筑工程学院,541699 南宁;
3. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室,530004 南宁)

摘 要:为了研究钢纤维全再生粗骨料混凝土的力学性能,以钢纤维体积掺量为变化参数,设计制作了 36 个试件进行立方体与圆柱体单轴抗压及棱柱体抗折试验。观察了试件的破坏过程及形态,获取了圆柱体单轴受压的应力-应变全曲线及棱柱体抗折的荷载-跨中挠度曲线,分析了钢纤维掺量对全再生粗骨料混凝土抗压及抗折的力学性能影响,并进行了各强度指标换算。结果表明:随着钢纤维掺量的增加,不同加载制度下立方体抗压试件的破坏形态整体性更好而圆柱体更差,钢纤维棱柱体抗折试件破坏时跨中裂缝在 5 ~ 8 mm;掺钢纤维为提高全再生粗骨料混凝土抗压强度时建议掺量为 1.5%;与不掺纤维相比,不同钢纤维掺量对圆柱体抗压强度影响不明显,部分试件有所降低,破坏时的峰值应变整体增大;随着钢纤维掺量的增加,圆柱体的静压弹性模量先增大后减小,其轴压韧性比逐渐增大;掺钢纤维不影响全再生粗骨料混凝土的初始韧性,峰值后的残余弯曲韧性随纤维掺量的增加不断增大。

关键词:钢纤维;全再生粗骨料;单轴受压;抗折;强度换算
中图分类号:TU528.572 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.05.017

Mechanical properties test and strength index conversion of steel fiber reinforced fully recycled coarse aggregate

SU Weiwei[1], CHEN Zongping[1,2,3], LIAO Haoyu[1], ZHOU Xingyu[1]

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, 530004 Nanning, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Nanning University, 541699 Nanning, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, 530004 Nanning, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of steel fiber reinforced fully recycled coarse aggregate concrete, a total of 36 specimens with varying parameters of volume ratio of steel fiber were designed and manufactured for uniaxial compression test of cube and cylinder and bending test of prism. The failure process and modes were observed. And the stress-strain curves of the cylinder under uniaxial compression and the load-deflection curves of the prism under bending were obtained respectively. The influence of vol-

收稿日期:2021-06-13 **修回日期**:2022-05-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51578163);八桂学者专项(No. 桂政发【2019】79);南宁市科学研究与技术开发计划重大项目(No. 20223024);广西重点研发计划资助项目(No. 桂科 AB21220012);广西科技基地和人才专项资助项目(No. 桂科 AD21075031)
通信作者:陈宗平。E-mail: zpchen@gxu.edu.cn
引用格式:苏炜炜,陈宗平,廖浩宇,等. 钢纤维全再生粗骨料混凝土力学性能试验及强度指标换算[J]. 应用力学学报,2022,39(5):947-957.
SU Weiwei, CHEN Zongping, LIAO Haoyu, et al. Mechanical properties test and strength index conversion of steel fiber reinforced fully recycled coarse aggregate[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(5):947-957.

ume ratio of steel fiber on mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete under uniaxial compression and bending was analyzed. Then the strength indexes were converted. The test results show that with the increase of volume ratio of steel fiber, under different loading systems, the integrity of the failure mode of the cube compression specimens is better, but the cylinder is worse. When the steel fiber reinforced prismatic specimens are damaged, the mid span cracks are 5-8 mm. In order to improve the cube compressive strength of fully recycled coarse aggregate concrete with steel fiber, the recommended volume ratio of steel fiber is 1.5%. Compared with the specimens without fiber, the influence of different volume ratio of steel fiber on the compressive strength of cylinder is not obvious, some of the specimens are reduced, and the peak strain at failure increases as a whole. With the increase of volume ratio of steel fiber, the static pressure elastic modulus of the cylinder first increases and then decreases, and the axial compression toughness ratio of cylinder under uniaxial compression gradually increases. Steel fiber does not affect the initial toughness of fully recycled coarse aggregate concrete, and the residual flexural toughness increases with the increase of volume ratio of steel fiber.

Key words: steel fiber; fully recycled coarse aggregate; uniaxial compression; flexura; strength index conversion

再生混凝土技术能够将废弃混凝土重复利用,具有促进社会可持续性发展和生态环境平衡等优点[1-3],但由于再生混凝土的各项力学与耐久性能指标较普通混凝土而言均有所降低,这将制约再生混凝土在实际工程中的应用与发展[4]。因此,研究利用新型材料改善再生混凝土的力学性能对进一步推广再生混凝土结构具有重要意义。

近年来,国内外已有研究表明钢纤维在普通混凝土中具有增韧、阻裂等作用,能够有效地改善混凝土的力学性能。张虎[5]进行了掺钢纤维的自密实轻骨料混凝土与不掺纤维的早期力学性能对比分析,发现钢纤维不仅能增大抗压及劈裂抗拉强度,也能改善其收缩与抗碳化能力;高丹盈等[6]提出了钢纤维混凝土与高强钢筋间的黏结应力分布计算方法,发现二者之间的平均黏结应力得到了有效提升;Li 等[7]进行了高性能钢纤维混凝土动态劈拉试验研究,结果表明,随着钢纤维的增加,混凝土的耗能能力及动态拉伸性能都有所提高;徐礼华[8]、钟光淳[9]、赵顺波[10]等分别研究了掺钢纤维混凝土不同受力状态下的应力-应变曲线后建立了本构模型,证明了掺钢纤维对混凝土的延性及耗能都有所提高。

另外,国内外对再生混凝土的基本力学性能研究也较成熟,但对掺入钢纤维后的全再生粗骨料混凝土的基本力学性能仍需进一步开展。为此,本研究通过 36 个试件的立方体和圆柱体抗压及棱柱体抗折试验,观察其破坏形态,研究掺钢纤维后对其力学性能指标的影响,以期为钢纤维全再生粗骨料混凝土的力学性能研究及工程实际应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验以钢纤维的体积掺量为变化参数设计并制作了 4 组(每组 9 个,共 36 个)同一批次的混凝土试件,每组试件包括立方体、圆柱体以及棱柱体,立方体试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm,圆柱体试件尺寸为 150 mm × 300 mm,棱柱体试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm。其中钢纤维的体积掺量有 0%、1%、1.5%、2% 4 种,混凝土采用全再生粗骨料混凝土,设计强度为 C30。各试件设计参数见表 1。

表 1 试件设计参数及部分测试结果

Tab. 1 Design parameters and some results of specimens

试件编号	ρ_f/%	混凝土强度等级	S_0/mm	f_{cu}/MPa
RAC-1	0	C30	140	35.86
SFRAC-1	1	C30	72	40.49
SFRAC-2	1.5	C30	58	46.14
SFRAC-3	2	C30	36	38.01

注:ρ_f表示钢纤维体积掺量;S_0 表示混凝土拌合物坍落度;f_{cu}表示立方体抗压强度。

1.2 试验材料及其性能

试验所用再生粗骨料采用原路面废弃混凝土,经过机器破碎后筛分,粒径为 5 ~ 25 mm 的连续级配。参照《建设用卵石、碎石》[11](GB/T 14685—

2011）的测试方法，测得再生粗骨料的松散堆积密度为 1 350 kg/m^3，表观密度为 2 586 kg/m^3，吸水率为 3.84%，压碎指标为 12.5%。粗骨料外形见图 1。



图 1　再生粗骨料

Fig. 1　Recycled coarse aggregate

试验所用钢纤维来自河北衡水某建材有限公司，钢纤维为剪切波浪形，如图 2 所示，纤维的抗拉强度等性能指标由厂家提供，纤维的体积密度采用排水法测得，纤维的物理及力学性能指标见表 2。

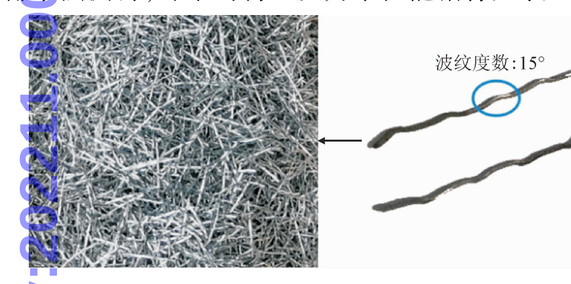


图 2　剪切波浪形钢纤维

Fig. 2　Sheared wavy steel fiber

表 2　钢纤维的物理及力学性能

Tab. 2　Physical and mechanical properties of steel fiber

纤维种类	l_f/mm	b_f/mm	h_f/mm	d_f/mm	l_f/d_f	ρ/(g·cm^{-3})	f_t/MPa
钢纤维	42	1	0.7	0.94	44.7	8	1 160

注：l_f、b_f、h_f表示纤维的长度、宽度和高度；d_f、l_f/d_f表示纤维的等效直径和长径比；ρ 表示纤维的体积密度；f_t表示纤维的抗拉强度。

试验所用细骨料采用天然河砂，人工筛分成粒径为 4.75 mm 以下，参照《建设用砂》[12]（GB/T 14684—2011）采用四分法取样烘干后对细骨料进行筛分试验，试验过程见图 3，级配曲线见图 4，分计筛余见表 3。



图 3　颗粒级配测试

Fig. 3　Grading test of particles

表 3　分计筛余

Tab. 3　Separated sieve residue

细骨料	分计筛余/%						
	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm	筛底
天然河砂	5.1	8.3	31.3	44.0	8.6	2.1	0.8

由图 4 可见，天然砂在Ⅱ区级配范围内，根据表 3 的筛分结果计算可知，天然砂的细度模数为 2.5，处于 2.3～3.0 之间，属于中砂；另外参照规范[11]，对细骨料进行了物理性能试验，其松散和紧密堆积密度分别为 1 500 kg/m^{3}和 1 680 kg/m^3，表观密度为 2 520 kg/m^3，含泥量为 0.56%。

试验所用水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，具体性能指标见表 4，拌养用水采用城市自来水，减水剂采用 YZ-M 聚羧酸高性能减水剂，减水率为 32%，掺量为 0.3%。混凝土配合比见表 5。

表 4　胶凝材料的物理力学性能指标

Tab. 4　Physical and mechanical properties of cement

SO_3/%	MgO/%	Cl^-/%	LOI/%	S/(m^2·kg^{-1})	IST/min	FST/min	3 d 强度		28 d 强度	
							R_f/MPa	R_c/MPa	R_f/MPa	R_c/MPa
2.01	1.25	0.01	3.02	357	203	250	5.9	27.4	7.7	45.0

注：LOI 为烧失量；S 为比表面积；IST 为初凝时间；FST 为终凝时间；R_f为抗折强度；R_c为抗压强度。

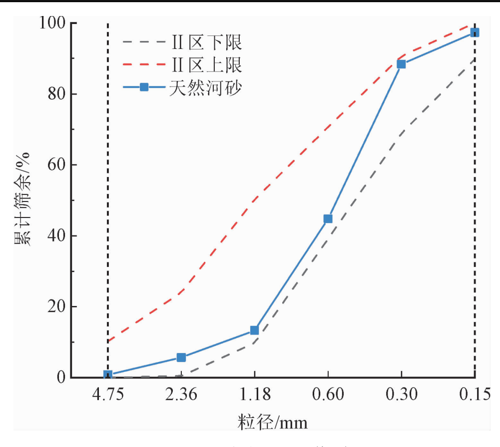


图 4　颗粒级配曲线

Fig. 4　Grading curve of particles

表 5　混凝土的配合比

Tab. 5　Mix proportion of concrete

水灰比	砂率	水泥/（kg·m^{-3}）	水/（kg·m^{-3}）	细骨料/（kg·m^{-3}）	粗骨料/（kg·m^{-3}）
0.43	0.32	641.98	275.86	525.43	1 115.06

1.3　混凝土配置及养护条件

钢纤维再生混凝土的配置采用 HJW-60 型搅拌机，每组 9 个试件同一批次搅拌后浇筑，过程如图 5 所示，其中再生粗骨料未进行预饱和面干处理，采用直接加水法[13]进行浇筑，由图 6 可知，纤维在混凝土内部呈三维乱向分布且较为均匀。参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》[14]（GB/T 50080—2016）进行坍落度测试，具体数值见表 1。所有试件都进行同环境条件下的自然养护。

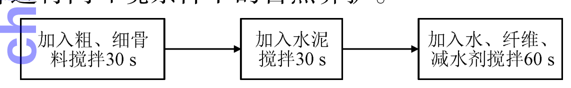


图 5　钢纤维再生混凝土配置方法

Fig. 5　Disposition method of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete

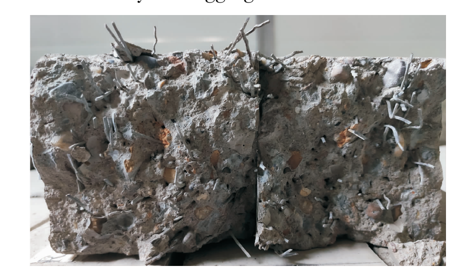


图 6　SFRAC-2 抗折破坏后截面图

Fig. 6　Cross section of SFRAC-2 after flexural failure

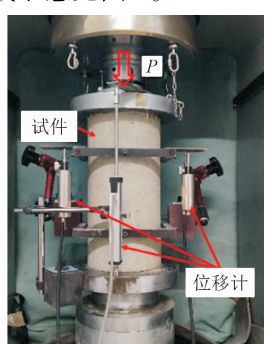
1.4　加载装置及制度

混凝土基本力学性能试验参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》[15]（GB/T 50081—2019）进行加载，加载装置采用 RMT-201 岩石与混凝土力学试验系统。立方体加载制度首先采用 10 kN/s 的力控加载达到 600 kN 后转为 0.01 mm/s 的位移控制，当荷载降到峰值荷载的 85% 时停止加载。

圆柱体加载制度为 0.005 mm/s 的位移控制加载，预压 100 kN 后加载试件，加载至荷载位移曲线接近水平时停止加载，以此来获取圆柱体单轴受压荷载-位移全曲线，为了对静压弹性模量的精准测量，在试件核心混凝土部分布置 2 个位移计，上压板至下压板布置 1 个位移计。

棱柱体抗折试验采用 0.002 mm/s 的位移控制，加载至跨中挠度为 3 mm 左右时停止加载，布置 1 个位移计测量跨中挠度。加载示意见图 7。





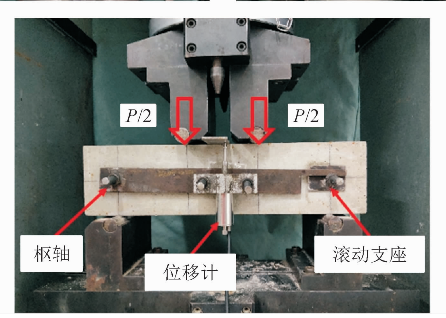


图 7　加载示意图

Fig. 7　Loading diagram for specimens

2　钢纤维增韧阻裂机理

2.1　复合材料理论

复合材料混合定律认为钢纤维增强混凝土的力学性能取决于纤维长径比、体积率、在基体中的分布取向及其与基体间的黏结应力等，其强度定义计算公式为

$$f_c = \eta_f f_f V_f + f_m V_m \tag{1}$$

其中：η_f为纤维在基体中的分布取向，$\eta_f = \eta_\theta \times \eta_l \times \eta_b$，$\eta_\theta$、$\eta_l$、$\eta_b$分别为纤维方向、长度和基体中界面黏

结对纤维的影响系数。复合材料理论能定性地分析钢纤维的增强效应,但真正效果还是与混凝土材料的物理化学状态和纤维的分布位置有关。根据国内外研究所见,钢纤维混凝土中大部分纤维还是从基体中拉拔失效的,故而强化基体与纤维间的黏结应力是改善纤维增强效果的主要途径。

2.2　纤维间距理论

1964 年美国学者 Romualdi 首次提出了纤维间距理论,其理论约束模型见图 8。

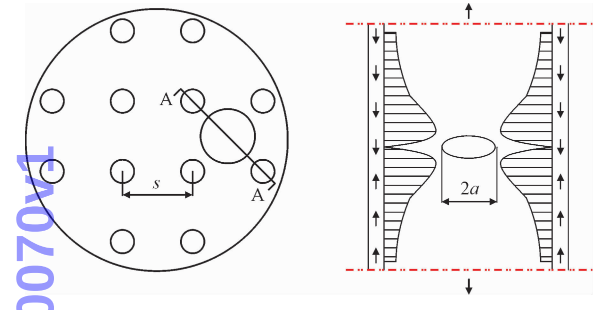


图 8　钢纤维在基体中的约束模型

Fig. 8　Constraint model of steel fiber in matrix

由图 8 可见,假设纤维在基体中定向分布且间距为 s,裂缝源周围的 4 根钢纤维对裂缝形成约束,裂缝扩展时,纤维附近产生的黏结力降低了裂缝尖端的应力集中,从而起到增强作用,所以钢纤维的间距越小,裂缝就更不易出现然后扩展。

3　坍落度试验及结果分析

混凝土拌合物坍落度是衡量其流动性的重要指标,试验分别对不同钢纤维掺量的全再生混凝土拌合物进行了坍落度测试,如图 9 所示。其测试结果见表 1,对比如图 10 所示。

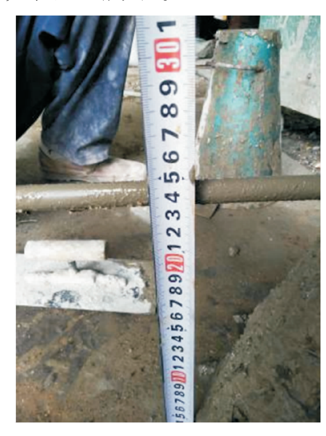


图 9　坍落度测试

Fig. 9　Slump test

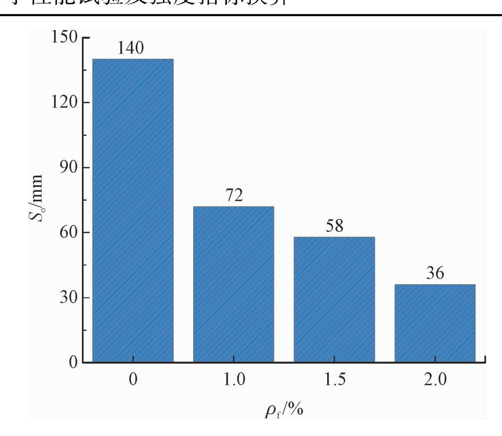


图 10　钢纤维掺量对拌合物坍落度的影响

Fig. 10　Effect of volume ratio of steel fiber on slump of mixture

图 10 表示钢纤维掺量对混凝土拌合物坍落度的影响。由图 10 可知,随着钢纤维掺量的增大,坍落度呈下降趋势,幅度在 48.6% ~74.3%,拌制过程中能明显发现拌合物流动性越来越低,说明钢纤维体积掺量的增大不利于施工。究其原因,相比不掺钢纤维,掺钢纤维能在浆体之间起到桥接作用阻碍其流动,且钢纤维掺量越多,钢纤维与浆体连接界面用水量就增大,故相同配合比下混凝土拌合物的自由水分减少,从而拌合物流动性下降。

4　立方体抗压试验分析

4.1　试验现象

加载初期,试件无明显裂缝产生,随着荷载的不断增大,经过弹性阶段后临近峰值时出现首条裂缝,部分立方体试件会伴随着起皮剥落;不掺纤维的素再生混凝土试件裂缝发展迅速且多条裂缝先后出现,表现出明显的脆性破坏;随着钢纤维体积掺量的增加,试件的裂缝发展有所减缓,破坏时其整体性更好。此时钢纤维主要是通过桥接作用阻碍裂缝的发展。试件的最终破坏形态见图 11。

4.2　结果分析

图 12 表示不同钢纤维掺量对立方体抗压强度的影响。由图可见，对于钢纤维全再生粗骨料混凝土，钢纤维掺量的增加对抗压强度有所提高，幅度在 6% ~28.7% 之间。但随着钢纤维掺量的增加,抗压强度是先上升后下降,由图可知,单掺钢纤维为了提高立方体抗压强度时,建议体积掺量在 1.5% 左右。

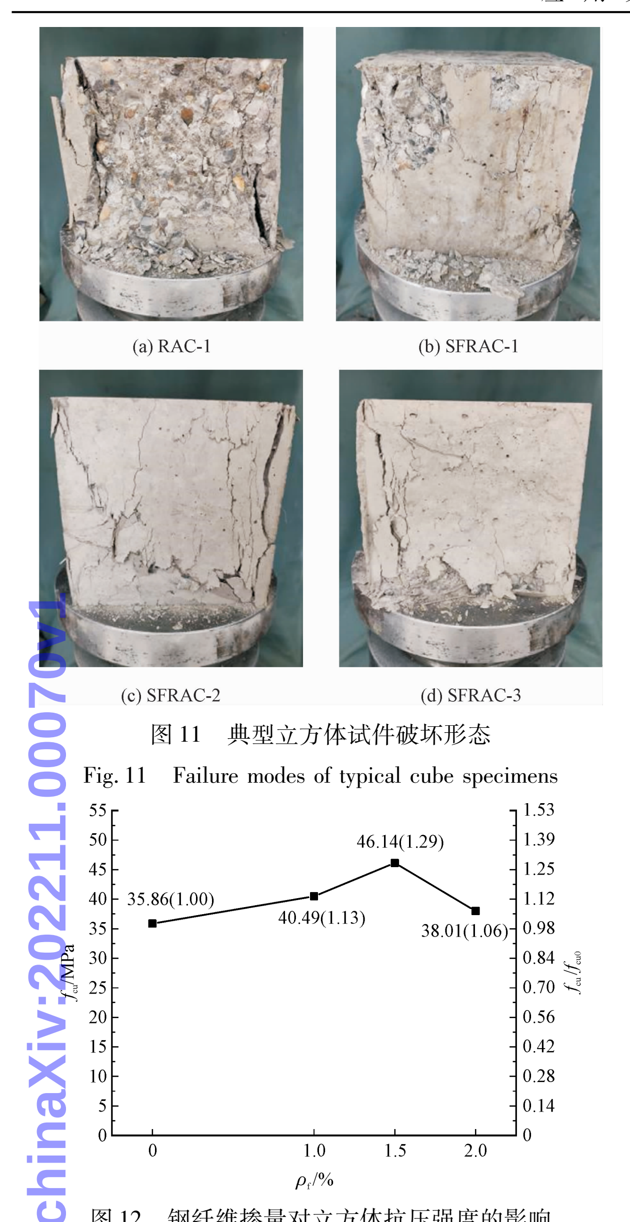


图 11　典型立方体试件破坏形态

Fig. 11　Failure modes of typical cube specimens

图 12　钢纤维掺量对立方体抗压强度的影响

Fig. 12　Effect of volume ratio of steel fiber on cube compressive strength

5　圆柱体单轴受压

5.1　试验的破坏特征

加载初期,试件处于弹性阶段,试件无明显变化,随着荷载增大至峰值荷载的 60% ~70% 时,试件表面砂浆层出现微小裂缝,峰值后不掺钢纤维的试件出现竖向贯通裂缝形成劈裂;掺钢纤维试件整体上出现裂而不碎的状态,裂缝多发生在外层砂浆包裹的钢纤维周围,原因是钢纤维抗压及抗拉强度远高于表层砂浆,试件钢纤维附近受集中应力状态下,导致其裂缝的产生。

试件的最终破坏形态主要表现为内部砂浆层的断裂,极少量的脆弱再生粗骨料出现劈裂,掺钢纤维试件的整体破坏形态比不掺纤维的更好,但持续加载下峰值后试件的轴向变形不断增大,加载停止时试件的轴向变形表现为 2% >1.5% >1% ,钢纤维掺量多的试件,其内部水平或斜向分布纤维受剪更为严重,故而表现出的破坏形态更差。具体破坏形态见图 13。

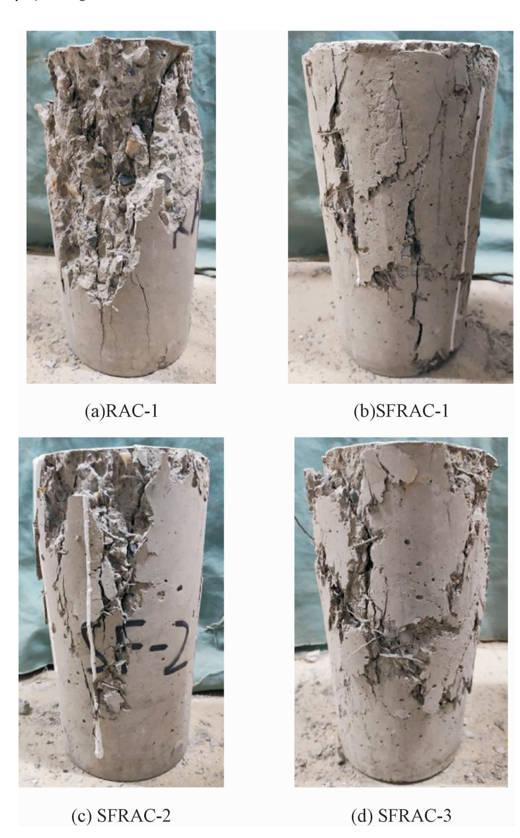


图 13 典型圆柱体试件破坏形态

Fig. 13　Failure modes of typical cylinder specimens

5.2　应力-应变曲线

通过试件实测的荷载-位移曲线结合位移计测得的核心混凝土处的位移,利用公式转化为应力-应变曲线。具体曲线见图 14,无量纲应力-应变曲线见图 15。

由图 14 可知,随着钢纤维掺量的增大,各应力-应变曲线斜率呈先增大后减小的趋势,但峰值后的下降段曲线更为平缓;由图 15 可知,随着钢纤维掺量的增加,上升段的弧度越来越大,不掺钢纤维的上升段基本呈线性增长。各试件的力学性能指标见表 6。

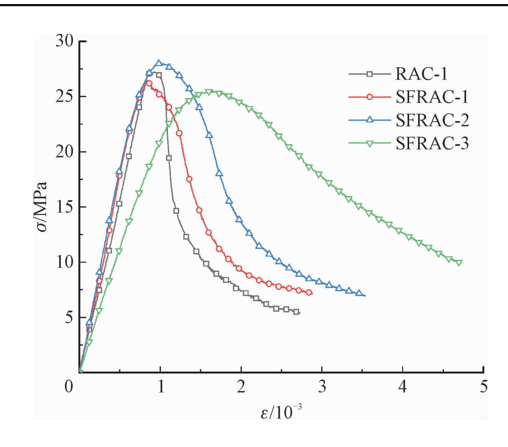


图 14　圆柱体单轴受压应力-应变曲线

Fig. 14　Stress-strain curves of cylindrical specimens under uniaxial compression

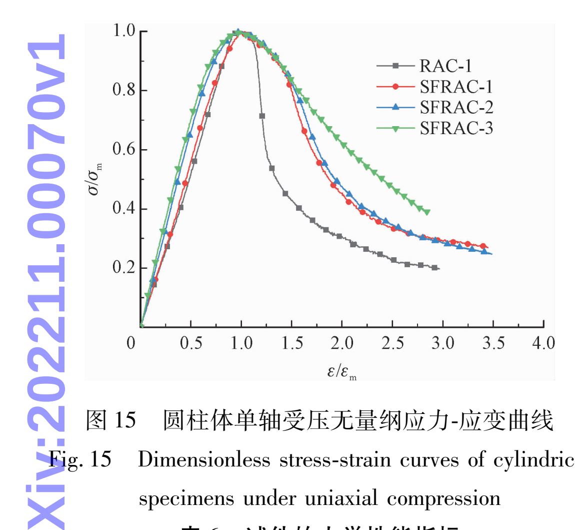


图 15　圆柱体单轴受压无量纲应力-应变曲线

Fig. 15　Dimensionless stress-strain curves of cylindrical specimens under uniaxial compression

表 6　试件的力学性能指标

Tab. 6　Mechanical property indexes of specimens

试件编号	$E_{cf}/10^3$ MPa	σ_m/MPa	$\varepsilon_m/10^{-3}$	$R_{e,1.0}$
RAC-1	30.2	27.2	0.93	0.455
SFRAC-1	33.8	26.4	0.84	0.553
SFRAC-2	37.2	28.1	1.01	0.643
SFRAC-3	22.6	25.6	1.65	0.733

注：E_{cf}表示静压弹性模量；σ_m、ε_m表示峰值应力与峰值点应变；$R_{e,1.0}$表示轴压韧性指数。

5.3　峰值应力及峰值点应变

由图 16 可知，与全再生粗骨料混凝土相比，掺钢纤维对圆柱体单轴受压的峰值应力影响不大；随着钢纤维体积掺量的增大，峰值应力呈先减小后增大再减小的变化趋势，整体幅度在 −5.9% ～3.3%。

由图 17 可知，随着钢纤维体积掺量的增大，峰值点应变整体上逐渐增大，2% 钢纤维体积掺量与不掺钢纤维的全再生粗骨料混凝土相比，其峰值点应变增大了 77.4%。综上所述，掺钢纤维在全再生粗骨料混凝土受压过程中，主要是延缓试件的压缩变形，对其抗压极限承载力影响不大。

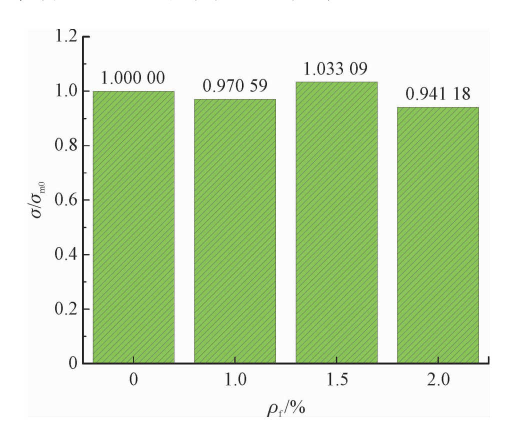


图 16　钢纤维掺量对峰值应力的影响

Fig. 16　Effect of volume ratio of steel fiber on peak stress of specimens

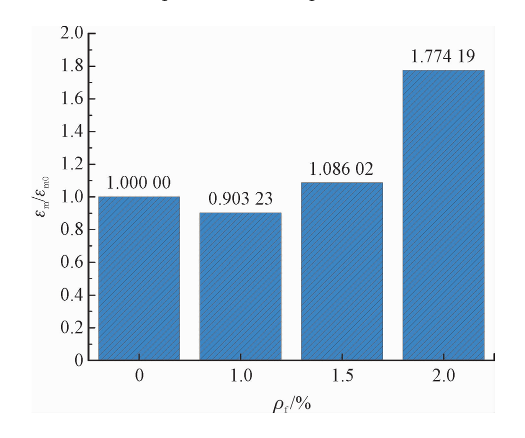


图 17　钢纤维掺量对峰值应变的影响

Fig. 17　Effect of volume ratio of steel fiber on peak strain of specimens

5.4　静压弹性模量

试验采用应力-应变全曲线的原点至 $0.4\sigma_m$ 的割线模量作为静压弹性模量值。图 18 表示钢纤维掺量对全再生混凝土静压弹性模量的影响。由图 18 可见，随着钢纤维掺量的增大，静压弹性模量先增大后减小，体积掺量为 1% 与 1.5% 之间的增大幅度在 11.9% ～23.2%；体积掺量为 2% 与不掺钢纤维相比，静压弹性模量降低了 25.2%。究其原因，由于再生粗骨料本身存在旧砂浆包裹，导致混凝土内部本身界面过渡区就比较薄弱，当钢纤维掺量过多时，相对整个试件而言，其胶凝材料占比就减少，故而混凝土体系内的水化产物占比减少，使得再生

粗骨料混凝土界面过渡区就更加薄弱，从而导致 2% 钢纤维掺量的再生粗骨料混凝土静压弹性模量变小。

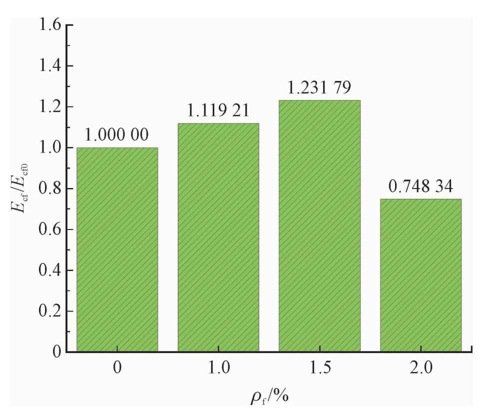


图 18　钢纤维掺量对静压弹性模量的影响

Fig. 18　Effect of volume ratio of steel fiber on elastic modulus of static pressure of specimens

5.5　轴压韧性比

轴压韧性比是反映混凝土在开裂后继续承担荷载时吸收能量的能力，其值等于荷载降至位移为 $0.01L_0$ 时荷载-位移曲线所围面积与 $0.01L_0$ 时 F_{max} 之比，其中 L_0 为轴压变形测量标距，具体计算公式参照《纤维混凝土试验方法标准》[16]（CECS13：2009）。

图 19 表示钢纤维掺量对全再生混凝土轴压韧性比的影响。由图 19 可见，随着钢纤维掺量的增加，试件的轴压韧性比不断增大，与不掺钢纤维相比，1%、1.5%、2% 体积掺量的钢纤维再生粗骨料混凝土的轴压韧性比分别增加了 21.4%、41.2%、61.0%。说明掺钢纤维能有效提高试件的轴压韧性比，钢纤维体积掺量越多，其峰值后吸收能量的能力更好。

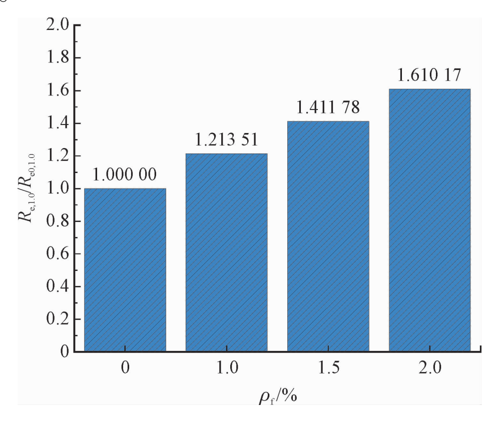


图 19　钢纤维掺量对轴压韧性指数的影响

Fig. 19　Effect of volume ratio of steel fiber on toughness index of axial compression of specimens

6　棱柱体抗折试验分析

6.1　试件的破坏模式

不掺纤维的全再生粗骨料混凝土抗折试验破坏模式表现为峰值后的脆性破坏，是典型的剪切破坏，具体表现为临近峰值荷载前跨中出现微裂缝，当达到峰值荷载时，微裂缝迅速向受压区延伸，试件破坏，最终裂缝只有一条。

掺钢纤维的抗折试件峰值后存在塑性软化阶段，临近峰值荷载前，试件跨中出现一条微裂缝，当达到峰值荷载时，裂缝缓慢发展，并在主裂缝旁伴随有 2 ~ 3 条次生裂缝，部分试件能听到钢纤维从基体中拉拔的“砰砰砰”响声，最终破坏形态为部分钢纤维拔出，裂缝扩展，表现出弯曲破坏模式。不同钢纤维掺量的再生混凝土棱柱体抗折试件破坏时，其裂缝宽度在 5 ~ 8 mm。具体破坏形态见图 20。

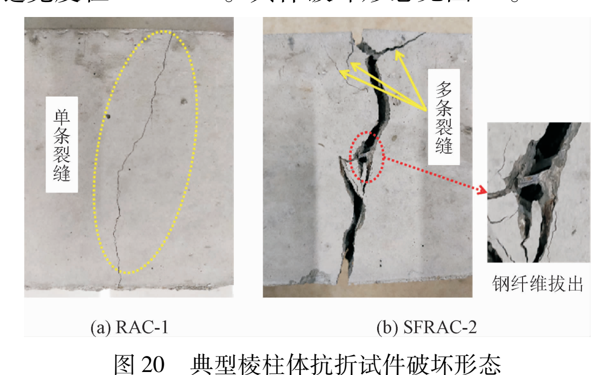


图 20　典型棱柱体抗折试件破坏形态

Fig. 20　Failure modes of typical prismatic flexural specimens

6.2　荷载-跨中挠度曲线

通过实测的荷载-位移曲线及位移计所测的跨中挠度，得到荷载-跨中挠度曲线，如图 21 所示。

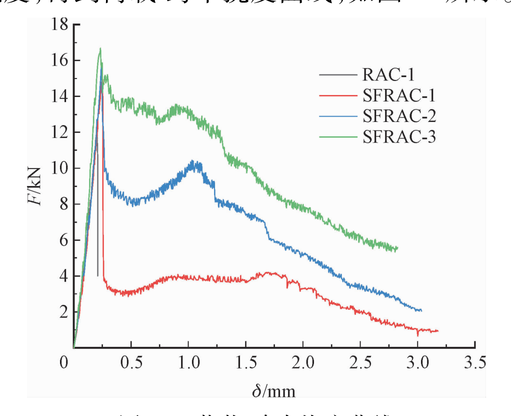


图 21　荷载-跨中挠度曲线

Fig. 21　Load-deflection curves

由图 21 可知,掺钢纤维对全再生粗骨料混凝土抗折的初始抗弯刚度及峰值挠度影响不大,掺 2% 钢纤维试件的初始抗弯刚度略有提高。

图 22 表示了不同钢纤维掺量的抗折强度。由图可知,随着钢纤维体积掺量的增大,抗折强度持续增大,掺 2% 钢纤维与全再生粗骨料混凝土相比,抗折强度提高了 36.2%,掺钢纤维相比不掺纤维抗折强度显著提升。

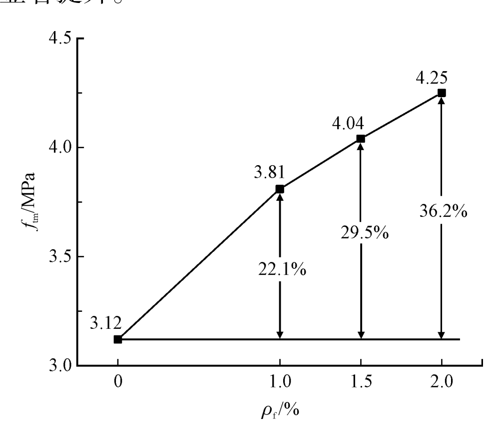


图 22　钢纤维掺量对抗折强度的影响

Fig. 22　Effect of volume ratio of steel fiber on flexural strength

6.3　弯曲韧性

抗折试件的弯曲韧性参照规范《钢纤维混凝土》[17](JG/T472—2015)的计算方法,将试件峰值位移前后分为 2 个部分,峰值位移前用初始弯曲韧度 $R_{e,p}$ 来表征,峰值位移后用残余弯曲韧度 $R_{e,k}$ 来表征,计算模型与计算公式参考文献[17]。

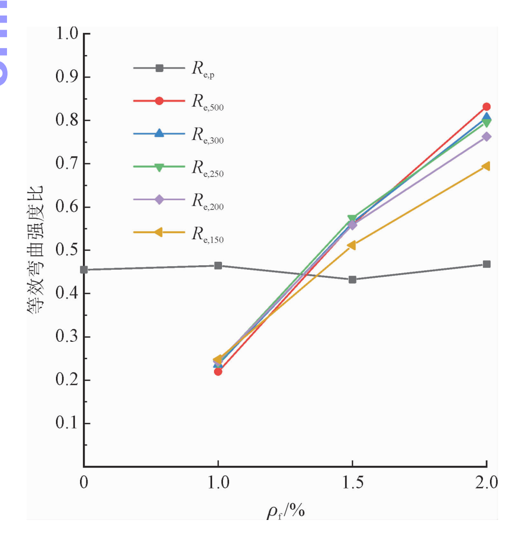


图 23　钢纤维掺量对等效弯曲强度比的影响

Fig. 23　Effect of volume ratio of steel fiber on equivalent bending strength ratio

由图 23 可知,不同钢纤维掺量的初始弯曲韧度 $R_{e,p}$ 变化不大,说明掺钢纤维不影响再生混凝土的初始弯曲韧性。对于掺钢纤维的试件,随着钢纤维掺量的增大,在试件峰值后的各个阶段(δ_k = 0.6 mm, 1 mm, 1.2 mm, 1.5 mm, 2 mm),其弯曲韧性是明显不断增大的。另外,随着钢纤维掺量的增大,试件在峰值后的各个阶段,其弯曲韧性下降更为明显。

7　强度指标换算

7.1　静压弹性模量 E_{cf} 的计算

为了确定钢纤维全再生粗骨料混凝土立方体抗压强度与静压弹性模量之间的关系,参考《混凝土结构设计规范》[18](GB50010—2010)和周静海等[19]的再生混凝土静压弹性模量的计算公式,2 种计算公式都如下模式。

$$E_c = \frac{10^5}{a + b/f_{cu}} \tag{2}$$

由于钢纤维体积掺量为 2% 时,圆柱体的静压弹性模量是降低的,体积掺量为 1.5% 与 2% 之间又缺乏有效数据,故本研究就仅掺量 0% ~1.5% 时讨论静压弹性模量的计算。图 24 显示了前 9 组数据的静压弹性模量 E_{cf} 与立方体抗压强度 f_{cu} 之间的关系,可以拟合出式(3),其拟合优度 R^2 = 0.997 96。

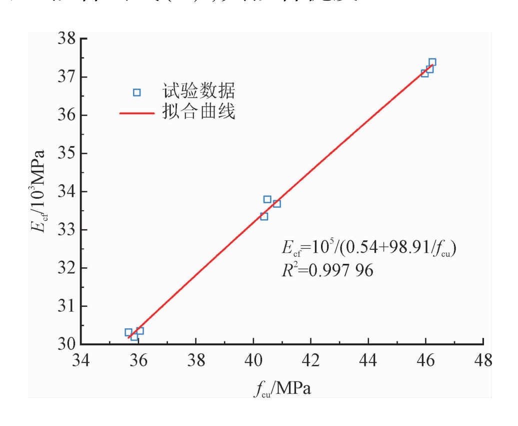


图 24　静压弹性模量与立方体抗压强度的关系

Fig. 24　Relationship between static pressure elastic modulus and cube compressive strength

$$E_{cf} = \frac{10^5}{0.54 + 98.91/f_{cu}},\quad 0 \leqslant \rho_f \leqslant 1.5 \tag{3}$$

图 25 显示了前 9 组数据的立方体抗压强度 f_{cu} 与钢纤维掺量 ρ_f 之间的关系,又由于 $\rho_f = \lambda_f l_f / d_f$, λ_f 为钢纤维含量特征值,可以拟合出式(4),其拟合优度 R^2 = 0.998 61。

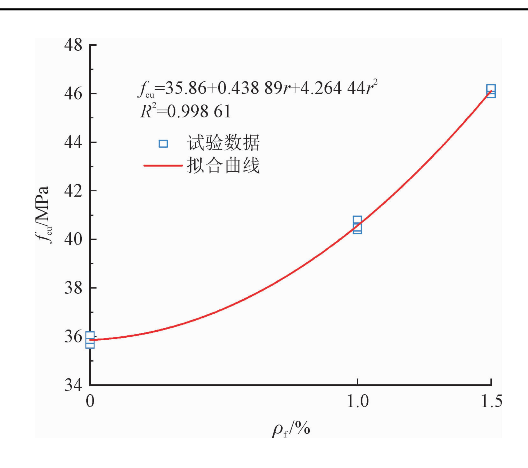


图 25 立方体抗压强度与钢纤维体积掺量的关系

Fig. 25 Relationship between cube compressive strength and volume ratio of steel fiber

$$f_{cu} = 35.86 + 0.00982\lambda_f + 0.00214\lambda_f^2, 0 \leqslant \lambda_f \leqslant 60 \quad (4)$$

故可得出静压弹性模量 E_{cf} 的计算公式为

$$E_{cf} = \frac{10^5}{0.54 + 98.91/(35.86 + 0.00982\lambda_f + 0.00214\lambda_f^2)}, \quad 0 \leqslant \lambda_f \leqslant 60 \quad (5)$$

7.2 强度换算

图 26 给出了钢纤维全再生粗骨料混凝土立方体抗压强度与抗折强度之间的关系。可以建立计算公式，即

$$f_{tm} = 0.2371 + 0.0854 f_{cu}, \quad 0 \leqslant \lambda_f \leqslant 89 \quad (6)$$

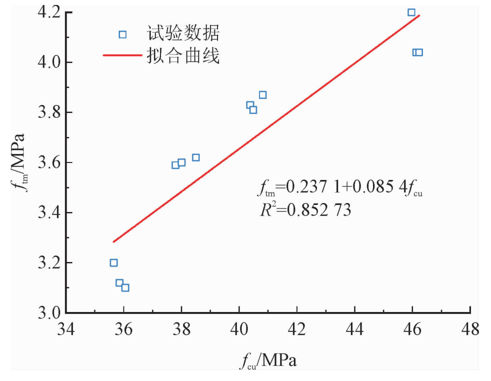


图 26 立方体抗压强度与抗折强度的关系

Fig. 26 Relationship between cube compressive strength and flexural strength

图 27 给出了钢纤维全再生粗骨料混凝土立方体抗压强度与圆柱体抗压强度的关系。由图 27 可知，可以建立关系，即

$$f_c = 117.586 - 4.582 f_{cu} + 0.057 f_{cu}^2, 0 \leqslant \lambda_f \leqslant 89 \quad (7)$$

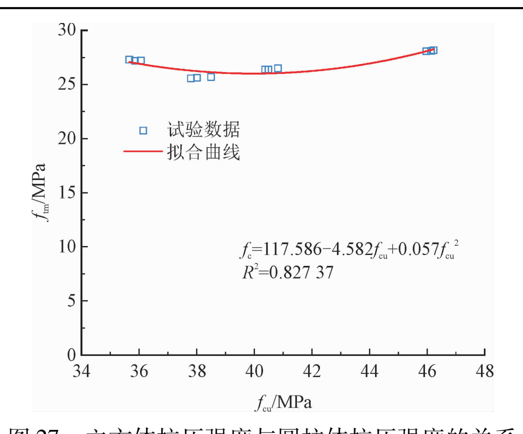


图 27 立方体抗压强度与圆柱体抗压强度的关系

Fig. 27 Relationship between cube compressive strength and cylinder compressive strength

8 结 论

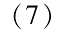
1）不掺钢纤维的全再生粗骨料混凝土抗压及抗折表现出明显的脆性破坏；随着钢纤维掺量的增大，立方体试件加载至 85% 峰值荷载时其整体性更好；圆柱体持续加载下峰值后试件的轴向变形不断增大，钢纤维掺量多的试件，其内部水平或斜向分布纤维受剪更为严重，从而试件的破坏形态更差。钢纤维体积掺量在 2% 以内时，棱柱体抗折破坏的裂缝宽度为 5 ~ 8 mm。

2）在不改变基体的配合比的情况下，随着钢纤维掺量的增大，坍落度呈下降趋势，幅度在48.6% ~ 74.3%，拌制过程中能明显发现拌合物流动性越来越低，说明基体配合比不变时钢纤维体积掺量的增大不利于施工。

3）掺钢纤维对立方体抗压时的峰值应力都有所提高，幅度在 6% ~28.7% 之间。但随着钢纤维掺量的增加，抗压强度是先上升后下降，单掺钢纤维为了提高立方体抗压强度时，建议体积掺量在 1.5% 左右；不同钢纤维掺量对圆柱体抗压强度影响不明显，部分试件有所降低，破坏时的峰值应变整体上逐渐增大。

4）随着钢纤维掺量的增加，圆柱体的静压弹性模量先增大后减小，其轴压韧性比逐渐增大。随着钢纤维的增加，抗折强度逐渐增大；掺钢纤维不影响全再生粗骨料混凝土的初始韧性，峰值后各阶段的残余弯曲韧性随着钢纤维掺量的增加不断增大，但峰值后试件的残余弯曲韧性随着钢纤维掺量的增加下降更为明显。

5）参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—



2010)对钢纤维再生混凝土的静压弹性模量计算进行了拟合,提出了钢纤维再生混凝土抗折强度、圆柱体抗压强度与立方体抗压强度之间的计算公式。

参考文献:

[1] 陈宗平,周春恒,陈宇良,等. 再生卵石骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报,2014,17(3):465-469.
CHEN Zongping,ZHOU Chunheng,CHEN Yuliang,et al. Mechanical properties of recycled pebble aggregate concrete[J]. Journal ofbuilding materials,2014,17(3):465-469 (in Chinese).

[2] ACHTEMICHUK S,HUBBARD J,SLUCE R,et al. The utilization of recycled concrete aggregate to produce controlled low strength materials without using Portland cement[J]. Cement and concrete composites,2009,31(8):564-569.

[3] 王国林,祁尚远,李聚义,等. 再生粗骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土,2020(3):168-171.
WANG Guolin,QI Shangyuan,LI Juyi,et al. Experimental investigation on mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Concrete,2020(3):168-171 (in Chinese).

[4] 寇世聪,潘智生. 不同强度混凝土制造的再生骨料对高性能混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报,2012,40(1):7-11.
KOU Shicong,PAN Zhisheng. Effect of quality of parent concrete on the mechanical properties of high performance recycled aggregate concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2012,40(1):7-11 (in Chinese).

[5] 张虎. 自密实钢纤维轻骨料混凝土的早期性能与损伤分析[J]. 材料导报,2017,31(20):124-128.
ZHANG Hu. Early Capability and damage analysis of self-compacting,steel-fiber-reinforced lightweight aggregate concrete[J]. Materials reports,2017,31(20):124-128 (in Chinese).

[6] 高丹盈,黄云超,金星,等. 高强钢筋钢纤维混凝土黏结应力分布计算方法[J]. 应用力学学报,2019,36(5):998-1004.
GAO Danying, HUANG Yunchao, JIN Xing, et al. Calculation method of bond stress distribution of high strength steel bar and steel fiber reinforced concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(5):998-1004 (in Chinese).

[7] LI X J,ZHANG Y Y,SHI C,et al. Experimental and numerical study on tensile strength and failure pattern of high performance steel fiber reinforced concrete under dynamic splitting tension[J]. Construction and building materials,2020,259:119796.

[8] 徐礼华,李长宁,李彪,等. 循环受压状态下钢纤维混凝土一维弹塑性损伤本构模型研究[J]. 土木工程学报,2018,51(11):77-87.
XU Lihua,LI Changning,LI Biao,et al. Investigation on 1D elasto-plastic constitutive model of steel fiber reinforced concrete under uniaxial cyclic compression[J]. China civil engineering journal,2018,51(11):77-87 (in Chinese).

[9] 钟光淳,周颖,肖意. 钢-聚乙烯醇混杂纤维混凝土单轴受力应力-应变曲线研究[J]. 工程力学,2020,37(增刊1):111-120.
ZHONG Guangchun,ZHOU Ying,XIAO Yi. Stress-strain behavior of steel-polyviny alcohol hybrid fiber reinforced concrete under axial compression and tension[J]. Engineering mechanics,2020,37(S1):111-120 (in Chinese).

[10] 赵顺波,赵明爽,张晓燕,等. 钢纤维轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(5):181-190.
ZHAO Shunbo,ZHAO Mingshuang,ZHANG Xiaoyan,et al. Study on complete stress-strain curves of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Journal of building structures,2019,40(5):181-190 (in Chinese).

[11] 陈家珑,周文娟,杨斌,等. 建设用卵石、碎石:GB/T 14685—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[12] 陈家珑,杨斌,周文娟,等. 建设用砂:GB/T 14684—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[13] 李孝忠,王庆贺,王玉银,等. 再生混凝土抗折强度的影响因素及其计算方法[J]. 建筑结构学报,2019,40(1):155-164.
LI Xiaozhong,WANG Qinghe,WANG Yuyin,et al. Influence factors and prediction methods for flexural strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of building structures,2019,40(1):155-164 (in Chinese).

[14] 冷发光,王晶,周永祥,等. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准:GB/T 50080—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[15] 冷发光,王永海,周永祥,等. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[16] 黄承逵,赵顺波,高丹盈,等. 纤维混凝土试验方法标准:CECS 13:2009[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

[17] 高丹盈,朱海堂,赵顺波,等. 钢纤维混凝土:JG/T 472—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[18] 赵基达,徐有邻,黄小坤,等. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[19] 周静海,何海进,孟宪宏,等. 再生混凝土基本力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(3):464-468.
ZHOU Jinghai,HE Haijin,MENG Xianhong,et al. Basic mechanical properties of recycled concrete experimental study[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(natural science),2010,26(3):464-468 (in Chinese).

(编辑　张璐)